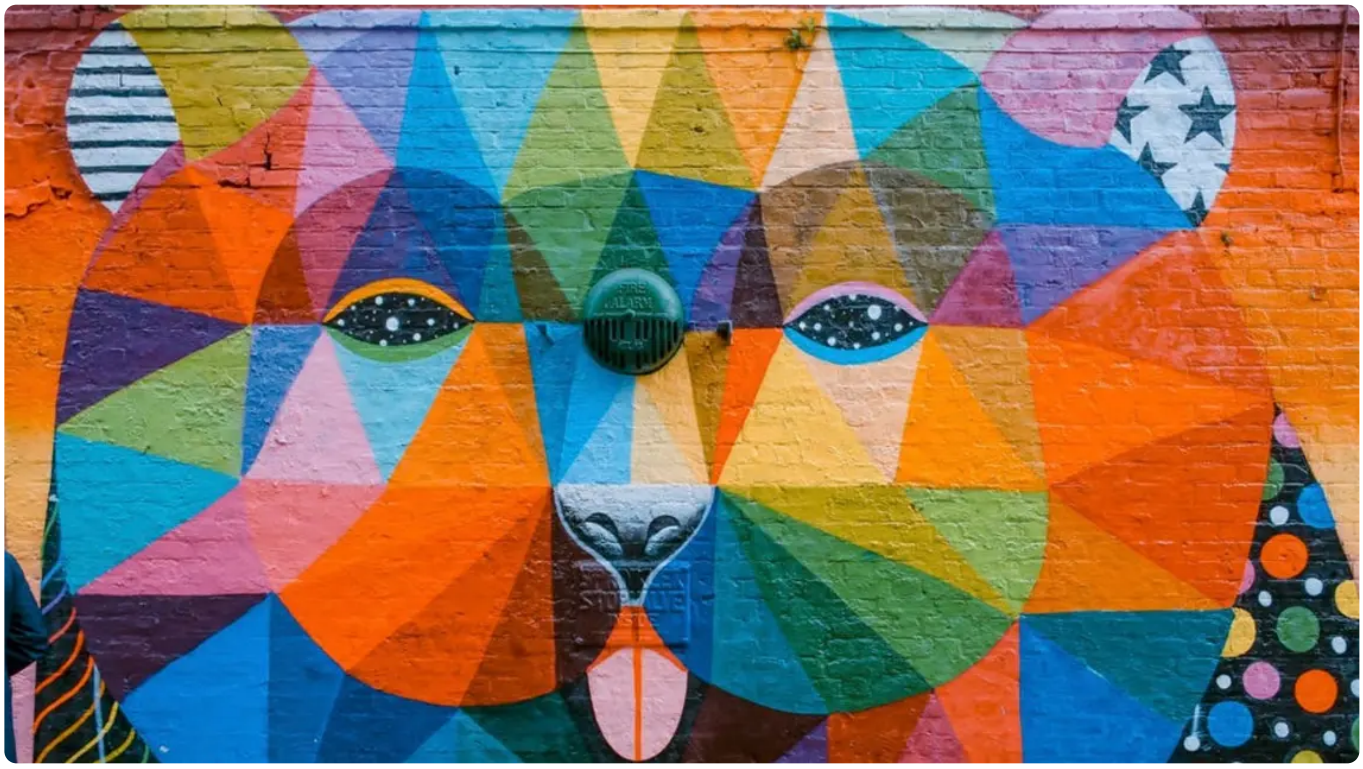
04 | 芯片制造：一颗芯片到底是如何诞生的（下）

2021-05-26 邵巍

《说透芯片》

课程介绍 >

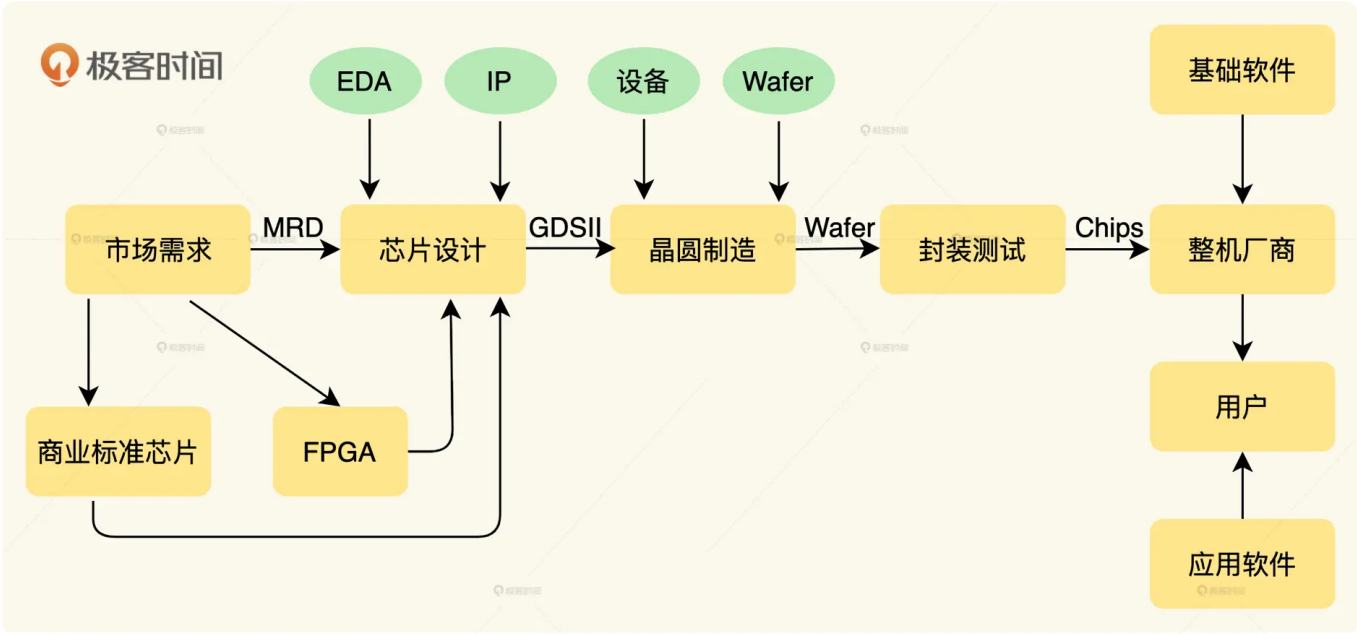


讲述：邵巍

时长 17:10　大小 15.73M

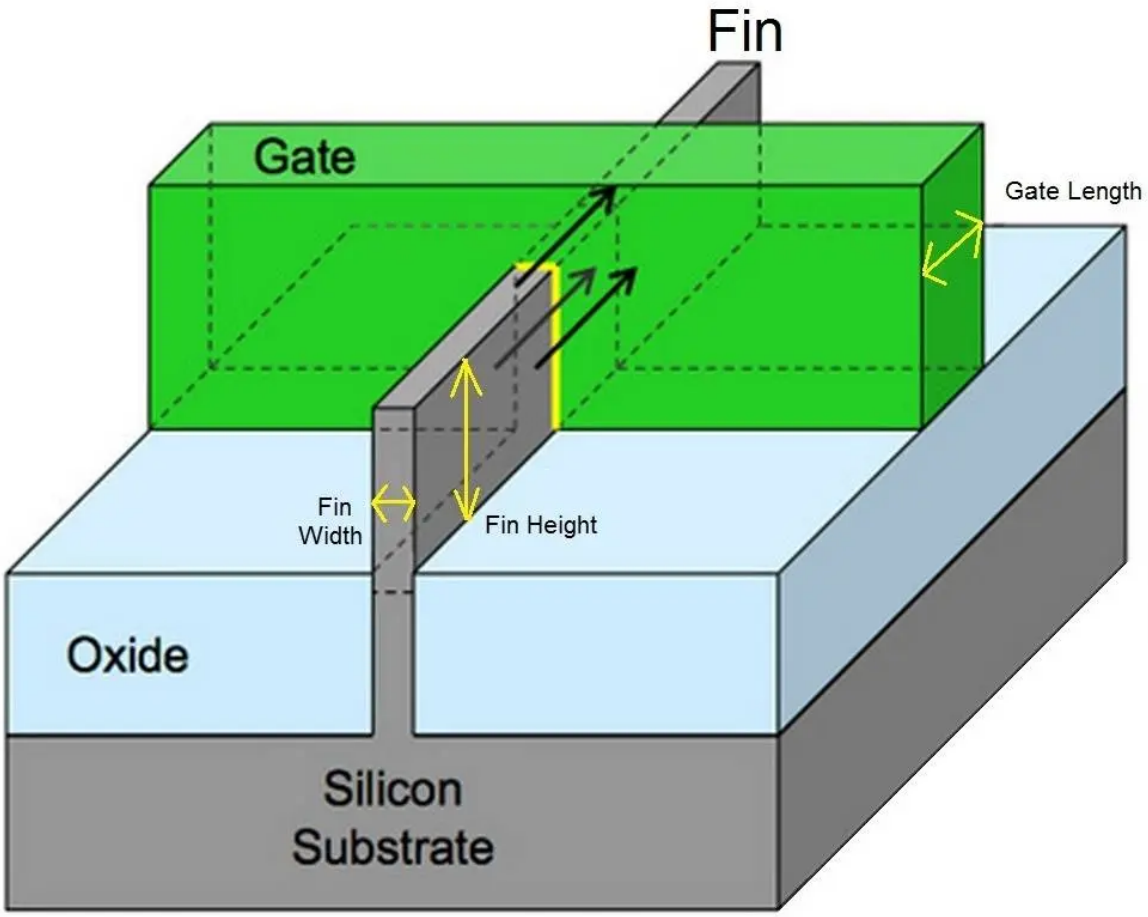
你好，我是邵巍。

上一讲，我带你从市场需求分析开始，完成了一颗芯片的设计。但是到此时，这颗芯片，还是一个纸上的产品，这一讲，我就带你从晶圆制造到封装测试，历遍芯片的完整制造流程。



芯片是这个世界上最复杂的工程，也是最高精尖的制造工艺。上一讲我跟你说过 iPhone 的 A11 处理器，大约在 88 平方毫米的面积上，集成了 43 亿个晶体管。43 亿个晶体管是什么概念呢？如果一秒钟制造一个晶体管的话，制造 43 亿晶体管需要 136 年。

如果仔细看每个晶体管，都是由硅基底（Silicon Substrate）、氧化层（Oxide）、鳍（Fin）、栅（Gate）构成的。鳍的高度，宽度都在十几、几十纳米；栅极长度，高度也在几十纳米的范围之内，是非常精致的纳米级器件。下图已经是简化过的抽象模型，随着半导体工艺的演进，实际的器件，其实比下图要更加复杂。



而芯片的制造，就是要在平方毫米的尺寸上，制造上亿个纳米级晶体管的过程。我们在讲芯片的物理实现的时候说过，每个晶体管，都是被工程师们精心设计，放置在特定的位置上，要完成一定功能的，因此在制造过程中，任何一个晶体管的失效，都会导致最终芯片的一部分，或者整个芯片的失效。

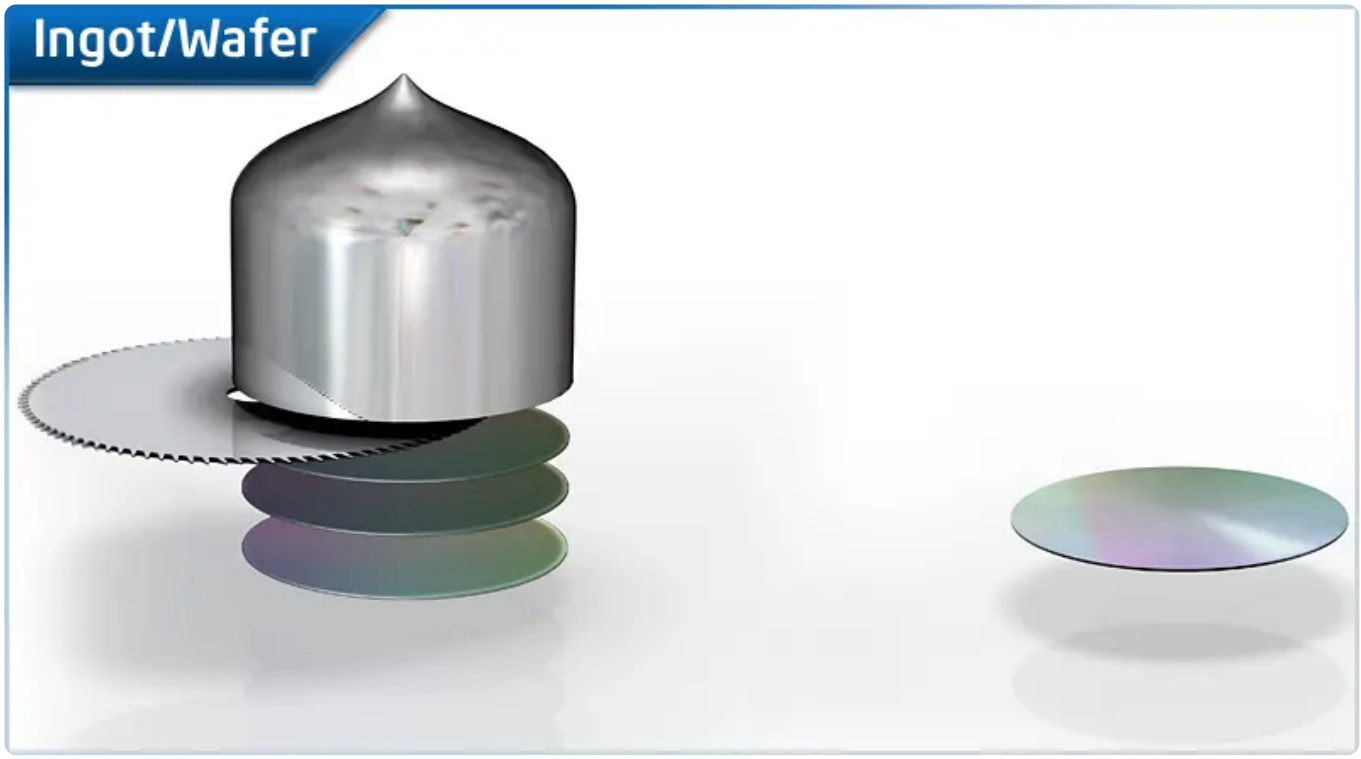
对于整个芯片的制造过程，我给你分了三个步骤让你理解，包括上游的晶圆材料准备，中游的晶圆加工，和下游的封装与测试。开头我给你展示了一张流程图，图中把晶圆制造和封装测试分成两步了，这里我换一种说法，分为上中下游，你也许能更好理解。我们一步一步来拆解。

芯片制造：晶圆厂的王国

上游：晶圆材料准备

这阶段的重点是提炼单晶硅锭。生产单晶硅锭的公司会将硅元素，从沙子中提取出来，经过高温整形、多次提纯等手段得到高纯度的硅（EGS）。然后再将纯硅熔化，抽出圆柱形的单晶硅锭。

硅锭切割之后，变成一片一片的圆盘，再经过打磨抛光，一片纯硅晶圆，就准备好了。



直径为 300 毫米的纯硅晶圆，俗称 12 寸晶圆，大约是 400 美金。但尺寸并不是衡量硅晶圆的最重要指标，纯度才是。日本的信越公司可以生产 13 个 9 纯度的晶圆。

其实，日本的信越、SUMCO（三菱住友株式会社），在晶圆市场上占据了近 60% 的市场份额，这让晶圆市场排名第三的台湾环球晶圆非常有压力，在 2020 年开展了并购排在第四的德国世创的计划。

其实半导体产业的上游原材料，不仅仅是晶圆，像在光刻胶、键合引线、模压树脂及引线框架等重要材料方面，日本的企业在全球都占有很高份额。可以这么说，如果没有日本材料企业，全球的半导体制造都要受挫。因此 2019 年日本限制向韩国出口三种半导体核心原料（含氟聚酰亚胺、高纯度氟化氢、光阻剂）时，曾经一度让三星实际掌门人不得不四处奔走，为保证生产而努力。

中游：晶圆加工过程

有了硅晶圆，下一步就是把设计团队交付的电路图，通过光罩，移植到硅晶圆上。这个加工过程，有上百个步骤，一般需要 2 到 5 个月。感谢现代社会的精细分工，即使是半导体从业人员，甚至是在晶圆厂工作的人，只要不涉及工艺的研发，也无需完全掌握这些步骤，只需要各司其职，共同协作就好。

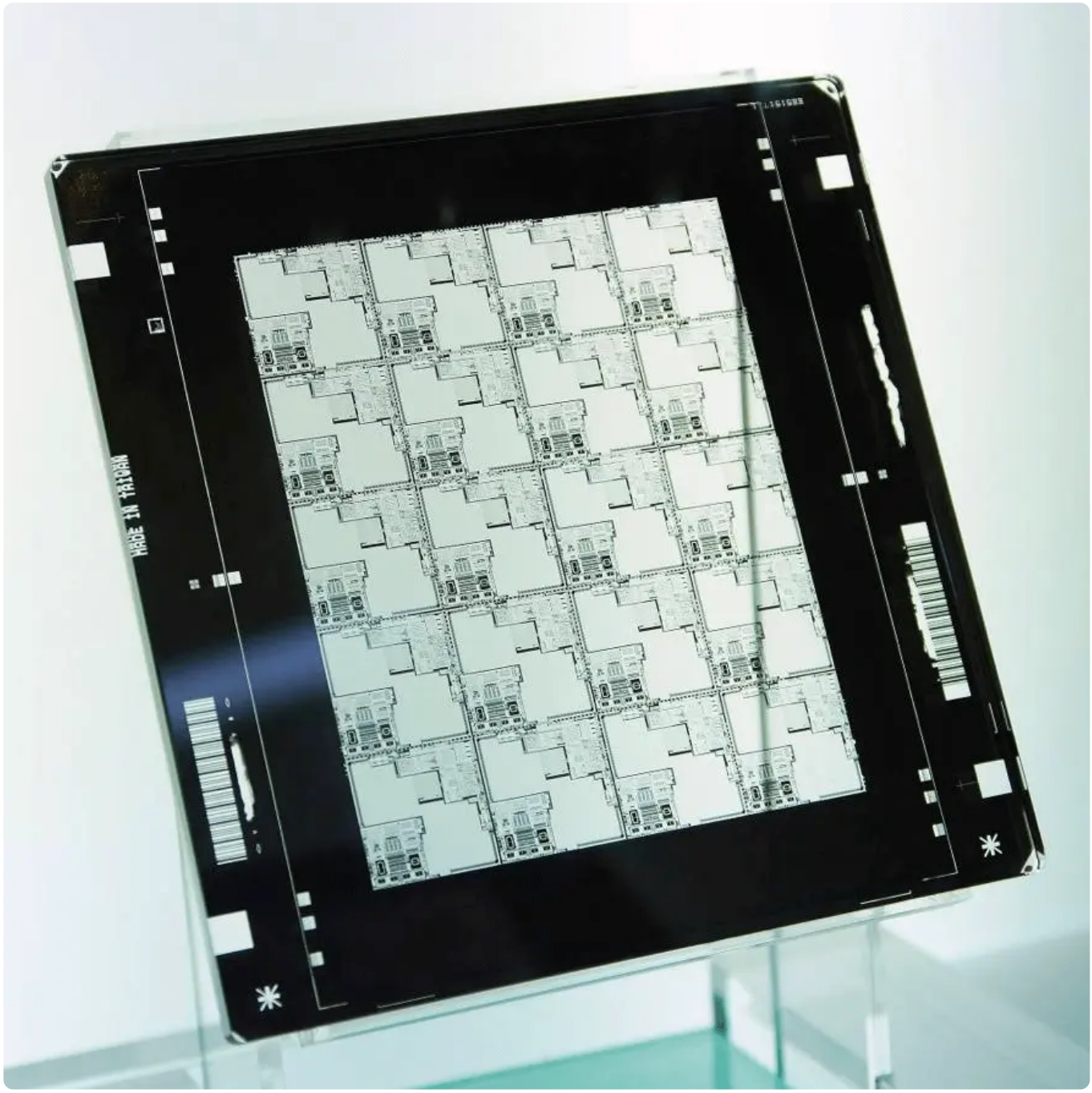
我把加工的过程简化为 7 个步骤，给你逐步讲解一下。

第一步，纯硅晶圆，在加工之前， 需要打磨抛光。

第二步，抛光完成后，通过高温，或者其他方式，在晶圆表面产生一层薄薄的二氧化硅保护膜，叫做镀膜。

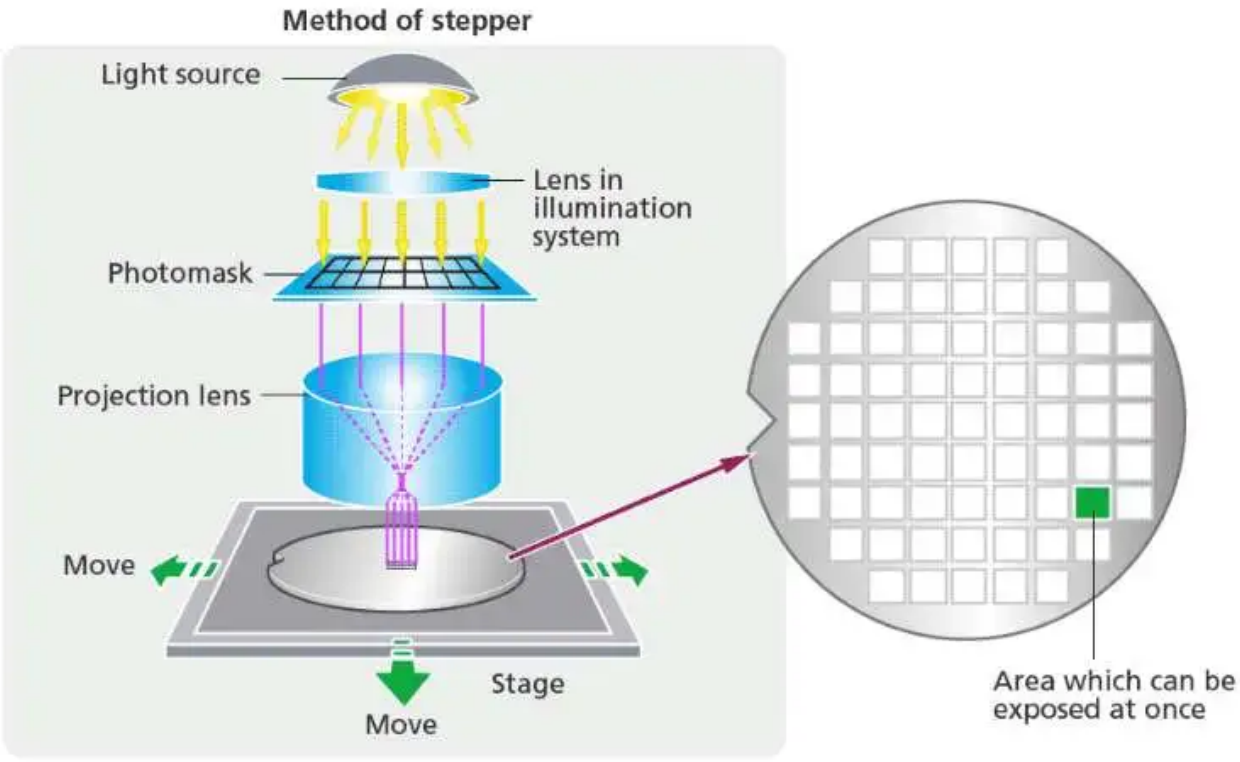
第三步，光刻，光刻是整个过程中最重要的一个环节。这个环节的重要性体现在两个方面，第一，它是设计和制造进行联系的唯一环节；第二它是最昂贵的一个环节。

光刻的一个重要输入是光罩。在上一讲中，设计团队交付的 GDS II 文件，会被用来制成如下的光罩。这个光罩，有点像印钞时候的母版，也是设计和制造之间的纽带。



光罩，有专业的公司可以生产。因为光罩和晶圆制造紧密衔接，所以一般晶圆制造厂，都有自己的专业工厂来生产自身需要的光罩。为了制造一款芯片需要上百道工序，光罩也是不只有一张的，在 14nm 工艺制程上，大约需要 60 张光罩，7nm 可能需要 80 张光罩甚至更多。光罩层数的增加，也就代表着成本的增加。工艺提升，带来的光罩层数的增多，算是先进工艺成本越来越高的原因之一。

使用特定波长的光，透过光罩，照射在涂有光刻胶的晶圆上，光罩上芯片的设计图像，就复制到晶圆上了，这就是光刻，这一步是由光刻机完成的，光刻机是芯片制造中光刻环节的核心设备。你可以把光刻理解为，就是用光罩这个母版，一次次在晶圆上印电路的过程。



刚刚我说，光刻是最贵的一个环节，一方面是光罩越来越多，越来越贵，另一方面光刻机也很贵。光刻机是半导体制造设备中价格占比最大，也是最核心的设备。2020 年荷兰公司 ASML 的极紫外光源（EUV）光刻机每台的平均售价是 1.45 亿欧元，而且全世界独家供货，年产量 31 台，有钱也未必能买得到。

回顾光刻机的发展历史，从 1960 年代的接触式光刻机、接近式光刻机，到 1970 年代的投影式光刻机，1980 年代的步进式光刻机，到步进式扫描光刻机、浸入式光刻机和现在的深紫外光源（DUV）和极紫外光源（EUV）光刻机，一边是设备性能的不断提高，另一边是价格逐年上升，且供应商逐渐减少。

到了 EUV 光刻机，ASML 就是独家供货了。

EUV 作为下一代技术的代表，不需要多重曝光，一次就能曝出想要的精细图形，没有超纯水和晶圆接触，在产品生产周期、光学邻近校正（OPC）的复杂程度、工艺控制、良率等方面的优势明显。是 7nm 以下工艺必备的。

光罩加光刻机，让光刻这个步骤 “贵” 了起来。

好，光刻之后，就到了第四步蚀刻，蚀刻就是去除多余物质。

第五步，离子注入，在真空的环境下进行离子注射，在光刻的晶圆电路里注入导电材料，这样可以改变对应区域的导电特性。

第六步，电镀，电镀这个步骤主要是用来制作铜导线的。

一颗芯片通常有多层，每一层的线路不同，功能不同，使用的膜的材质不同。所以每一层的光罩也不同。因此，**以上的 1-6 步需要根据实际的集成电路的设计层数重复进行几次到数十次**。这里可以有一个小知识点，如果芯片有一些小 Bug，可以只对其中几层的光罩进行修正，而不用重做全部的光罩。

第七步，测试，测试永远是重要环节。对于晶圆的测试可以分成两类，一类是制造工艺相关的晶圆验收测试，一类是电路功能测试。当然，当晶圆切割完毕，在封装之前，还会再进行测试。不过对于整个晶圆进行测试，效率要高过切割之后。

这里我们可以复习一下上一讲逻辑设计中提到的 DFT 环节。在进行电路的前端设计时，就预先设计并插入用来测试的电路，这就是 DFT。后期，无论是晶圆的电路功能测试，还是封测阶段中最后的测试，都是依赖 DFT 设计的。

芯片制造的中游环节，到这里就介绍完了。我一定要提一下价值问题，这么昂贵的工厂制造环节，究竟可以增值多少呢？据国际商业策略 IBS 公司（International Business Strategies）的推算，台积电一片 5nm 晶圆的加工费高达 12500 美金。根据台积电的财报推算，台积电平均每片晶圆可以产生近 4000 美金（300mm 晶圆）的利润。无论是哪个数字，对比 400 美金的纯硅晶圆原料来说，这都是一个至少增值 10 倍的高价值的加工过程。

下游：封装与测试

当晶圆制造进行测试之后，就会被送往下游的 IC 封装测试厂实施切割、封装和进一步的测试。

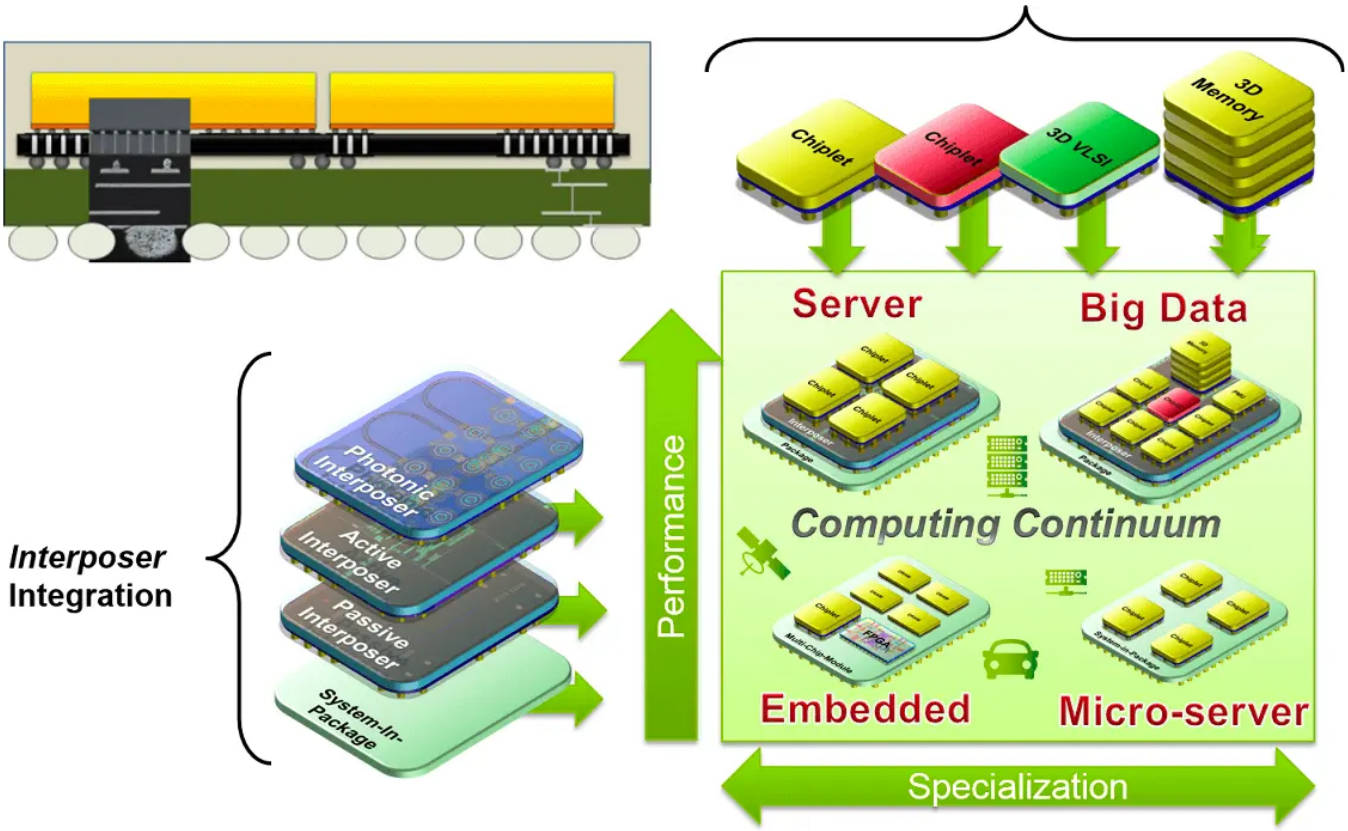
整个晶圆在切割成单片之后，会针对每一个单片（芯片）进行电气测试。在封装前，还会使用显微镜对芯片进行复检。提前检测出有瑕疵的芯片，可以减少后续流程上的成本开销。

封装的主要目的是将半导体材料集中在一个保护壳内，防止物理损坏和化学腐蚀。相对于测试，封装对芯片的最终形态，影响更大。

半导体封装技术有三次大的技术进步：第一次是在 20 世纪 80 年代从引脚（Pin）插入式封装到表面贴片封装，表面贴片封装极大地提高了印刷电路板上的组装密度；第二次是在 20 世纪 90 年代球型矩阵封装的出现，满足了市场对高引脚的需求，改善了半导体器件的性能。

第三次是 2D、2.5D、3D 封装等，混合了芯片堆叠、异构封装的先进封装。先进封装的最主要推动力来自手机，因为手机有着对封装面积最小的极致追求，其次推动力来自于数据中心对高性能芯片的追求。

关于 2D、2.5D、3D 封装，我有一个朋友有个非常形象的比喻，“摊大饼摊不下去了，搞个千层饼试试”。总之，所谓的先进封装，就是把单独设计和制造的组件或者小芯片（chiplet），封装在一起，如下图。

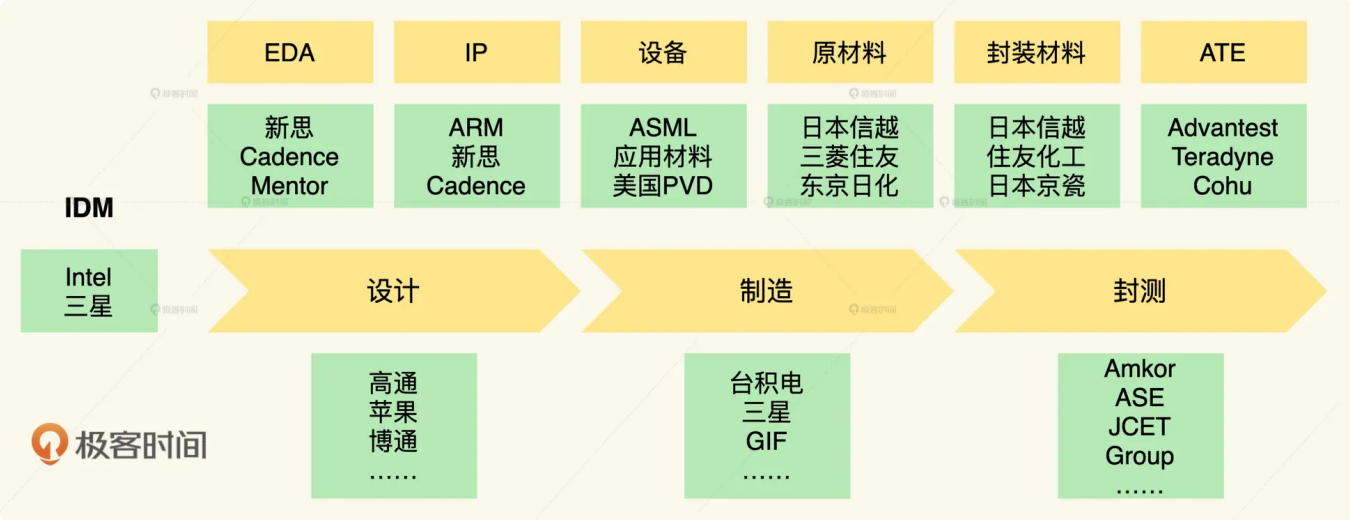


封装之后，还会对每个芯片进行最后的测试。这个环节是由 ATE 专业自动测试设备完成的。因为一般的公司，都是租用 ATE 机台，所以每个芯片的测试计划，测试时间等，都是成本的一部分。一般的经验是，一颗芯片的 1/3 的成本，是花在封测阶段的。

基于测试的结果，将具有相同能力的芯片归属一类，可以根据芯片的最高工作频率，稳定性等规格制定等级，以便定价。该芯片就会被打标示，分类芯片的规格、型号及出厂日期等丝印，等待打包出厂了。有部分缺陷的芯片，在很多时候是可以作为低规格的正式产品出厂的。要做到这点，必须在架构设计阶段，就要规划好。一个优秀的架构师，考虑的不仅仅是功能和性能的竞争性，整个流程中的每一个与芯片成本相关的问题，都必须提前考虑周到。

到这里，芯片制造的过程我就讲完了，目前除了极少数半导体设计公司还有工厂之外，芯片的制造是都由**专业的晶圆厂**代为制造，是晶圆厂的王国领地。上一讲我们提到的芯片设计，和这一讲分析的芯片制造与封测，并不需要一个公司完成，我给你总结了一个产业链的分工合作示意图：

产业链分工视角：设计、制造、封装、测试的分工合作

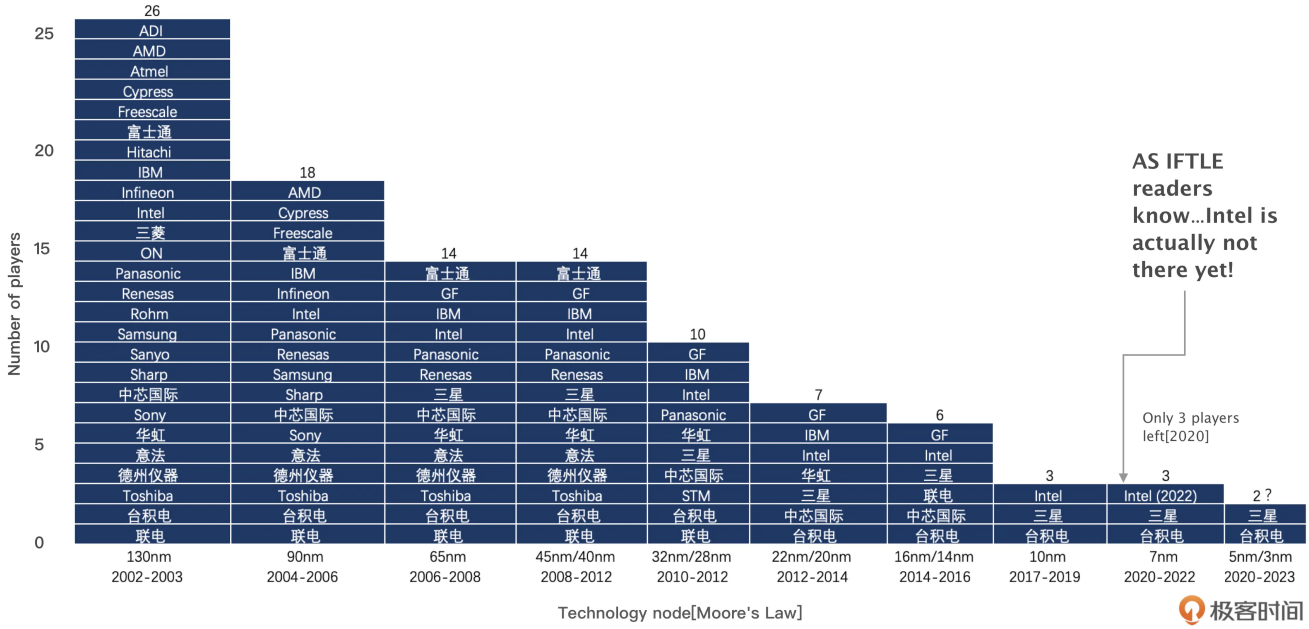


在半导体行业开始的三十多年，所有的半导体公司，都是从设计到制造全部自己完成。在下一讲介绍 Intel 的时候，我会提到当 IBM 向 Intel 订购芯片，Intel 会设计、制造、测试、封装，然后直接交付芯片。这种模式业界称为集成设备制造商，也就是 IDM 模式。

这种模式，在 1987 年台积电创立之后，慢慢地改变了。台积电这样的代工厂，专注于芯片制造这个环节，服务整个半导体产业。越来越多的创业公司，选择放弃需要高额资金的建厂环节，专注在价值更高的设计芯片环节。设计和制造开始了分离。

在摩尔定律的推进下，半导体行业高速运转，半导体工艺从 45nm，到 28nm，到 16nm 不断演进，随着晶体管体积不断变小，建造工厂的成本剧增。能够维持一定的生产规模，进行良性的商业循环的 IDM 模式公司在减少，甚至专业的晶圆厂都在逐步减少之中。

下图是一张工厂对应工艺制程的总表。到了 10nm 工艺制程的时候，全世界晶圆厂也就只有三家了。



那些原来的 IDM 模式的公司都怎样了呢，有的完全剥离工厂，成为无厂的纯设计公司，例如 AMD、IBM。有的放弃跟随新工艺，成为轻工厂模式，例如博通，德州仪器。

制造和设计分离之前，技术和资本门槛都略低的封测环节，就已经被分离，且向人力资源成本便宜的亚洲转移了。半导体行业是全球化分工最早最彻底的行业之一。这也是中美之争中，芯片行业会成为一个焦点的原因。

总结

这一讲我分享了蛮多内容，下面简单总结一下。

1. 半导体行业的两个重要增值的过程是：晶圆加工和芯片设计。最先进工艺的晶圆制造，价值不菲，是制造业的顶级工艺。
2. 晶圆的加工过程，就是在晶圆上制造集成电路的过程。更准确的说，是在晶圆构造海量晶体管的过程。其中光刻环节最为重要。
3. 晶圆加工完成之后，还要经过切割，测试，封装为芯片。封装技术，已经成为和架构、工艺并行的第三大技术。
4. 台积电的出现，促使了半导体公司由一包到底的 IDM 模式，向代工模式转换。半导体行业是全球化分工最早最彻底的行业之一。

最后，关于芯片制造，Intel 有一个形象的动画视频，很不错，推荐你看一下。

思考题

芯片的制造环节究竟有多重要？美国公司放弃 IDM 模式，将生产制造环节转到亚洲的这个做法，是正确的么？欢迎你给我留言。

分享给需要的人，Ta订阅后你可得 20 元现金奖励

赞 6 提建议

© 版权归极客邦科技所有，未经许可不得传播售卖。 页面已增加防盗追踪，如有侵权极客邦将依法追究其法律责任。

上一篇 03 | 芯片设计：一颗芯片到底是如何诞生的（上）

下一篇 05 | Intel的发展史就是一部芯片行业的创新史（上）

精选留言（20）

写留言

詹姆斯Li

2021-05-26

美国制造业外迁是大范围的，不仅是芯片，对不对我觉得可以看3个层面，
站在企业角色做战略聚焦，把经历放在利润更大的上游无可厚非，但是这样要保证研发设计方向不能踏空，比如intel在移动互联方面和ai方面就有点踏空，导致现在有点落后了。
站在国家角度属于战略失误吧，整体产业控制力减弱，就业也受影响，
站在国际角度供应链协作，生态开放，优势互补是我觉得正确的

展开

作者回复: 同意，国家战略角度必须干预，不能放任企业按经济规律办事。

6

iLeGeND

2021-05-27

摩尔定律不是对结果现象的大致描述吗？怎么还能当公式去做为原因倒推结果呢

作者回复: 这就是从事实中抽象出理论，然后再用理论指导实践的过程。太多理论，不是物理/自然理论，而只是前人的经验总结而已。

3

送过快递的码农

2021-05-26

芯片制造应该是整个流程中我认为是至关重要的一环。。。他决定了之前的设计能不能落地，参考海思就知道了。也就是 我们痛了，才知道全产业链的重要性

展开

作者回复: 也有道理，短板就是重点。

2

彭海民

2021-05-26

对于芯片这种高精尖的产品，它的制造环节和设计环节的重要性相当。
美国公司放弃 IDM 模式，将生产制造环节转到亚洲的这个做法对整体行业的发展是好的，美国公司专注顶层设计，依然能保持行业龙头地位。但是分工越细，竞争对手想要赶超就只需单点突破，理论上更容易被超越？

展开

作者回复: 美国公司专注设计是因为利润更高。设计上想超越，也不容易... ...特别是芯片设计和软件生态强强联手的时候。

1 2

jssfy
2021-06-09

请问ARM在芯片设计阶段起到什么作用呢？具体的设计和制造环节都没有提到ARM，但是最后的产业链分工视角里有写到ARM了，不太理解是否有直接或者哪些间接的联系或者影响

作者回复: arm卖IP， 如果做一个有arm CPU的soc， 前端设计的CPU代码是有arm公司提供的，就是在RTL的阶段。 如果soc中没有arm的CPU，就没有arm什么事了。

1

CaptainJackey
2021-05-27

美国表面上将生产制造环节转到亚洲，但在ASML光刻设备的专利、配件供应有足够话语权，所以本质还是占领着制高点。而设计环节更不用说，EDA和IP生态足以让其设计保持领先地位。

作者回复: EDA和IP生态，美国真是很强。同时美国也在反思制造环节的重要性。

1

Payne
2021-05-26

IBM出2nm芯片了

展开

作者回复: IBM研发出2nm的工艺流程（类似于IP），要晶圆厂落地量产，良率达到一定程度，才算是“有2nm的芯片”

1

Lorry

2021-06-27

荷兰的光刻机之前看到一篇文章，好像还是要被淘汰了，所以最近才主动找中国合作，是这样吗？

作者回复: 目前看，ASML还在巅峰状态

Longerian

2021-06-02

放弃IDM模式，在商业是应该是合理的，可以参考李嘉图比较优势理论；但对一个国家行业的发展战略上，可能会有影响，就好比现在美国已经无法生产iPhone，更是缺少了一整条供应链的制造能力

作者回复: 一个国家，特别是大国，应该是产业链完整。
一个公司，可以只专注于价值最高的环节。

唐宏伟

2021-05-31

从芯片制造的全产业链来看，只有国内企业完全进入整个链条中的细分领域，实现全产业链的国产化配置，达到世界领先制程工艺的小微精芯片从自研到自产才可能实现，得确不是一两家企业能独立完成的。

作者回复: 同意。而且我觉得中国是最有建设完整产业链条件和动力的国家。

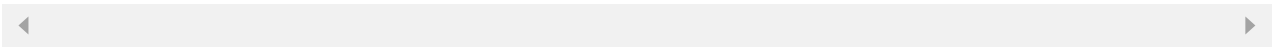
水天一线

2021-05-28

在美国没有限制芯片行业之前，行业都认为芯片是一个全球协作的体系，包括经济和科技的各类专家，一开始也都会从中国对芯片的采购规模来权衡得出，美国应该不会做特别严的限制，目前来看没有彻底堵死中国企业采购，从美国这个限制的动作，我国也要重新评估芯片产业，把其作为国家产业战略来考虑。老师可以在后面谈谈我国在芯片产业的布局。我国其实在芯片方面很早就做了规划，但是因为研发费用高，投资周期长，之前出...

展开

作者回复: 中国需要重新评估芯片产业，美国自己也需要的，都在反思。 华为真是行业之光。

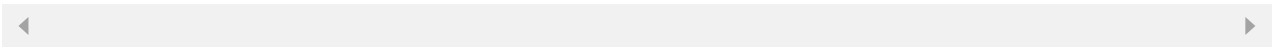


！null
2021-05-27

看不到打破垄断的希望

展开

作者回复: 事在人为，竞争对手的先进也是由人完成的，不过是有先发优势而已。努力干，总会追上，并且反超的。



Panda
2021-05-27

核心技术和产业必须要有国家出面 牢牢地抓在自己手里, 尤其是关系到国家安全的

作者回复: 赞同。

kai
2021-05-27

邵老师好，能分析下intel和amd各自芯片的优缺点么，感觉intel是一路领先，他的优势在哪？amd在制程提升后，有反超的势头，但是优势也不明显，是为什么

展开

作者回复: 这个可真是一个大话题，有各种专业的评测机构，全方位的测评不同型号的Intel，AMD的芯片，做对比。

CPU设计是一个非常有历史感的话题，现在CPU上用的一些技术，往往是199x年代就有学术论文的技术。

到了现在AP时代，不但要看CPU，还要看GPU， 看soc总体性能，还有compiler/OS优化程度等等。

不是单一指标能决定的。

竞争会胶着一段时间，没那么容易分出胜负。

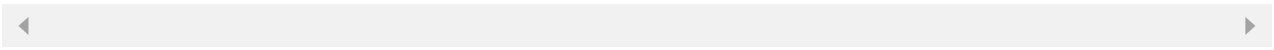
Skysper

2021-05-27

台积电怎么底蕴这么厚？

展开

作者回复: 多年积累，多代工程师和客户经验的叠加。



宝木山石

2021-05-26

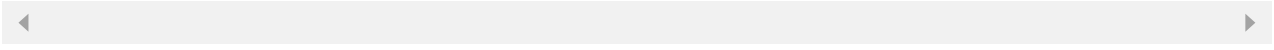
邵老师您好，我干了MCU系统与应用工程十多年了，但对芯片的来龙去脉一直缺少全面了解，听了您的课觉得很开阔眼界。您现在有兴趣出山来定义高端MCU芯片吗？比如像i.MX RT1170这类的后续roadmap。现在我们缺人，您如果有兴趣，可以联系我，rocky.song@nxp.com

fy

2021-05-26

最近intel换帅了，时隔工作30多年的帕特再次回来上任，股价撑撑往上涨，同时还开展IDM2.0战略

作者回复: 希望Pat能实现中兴 ... ...不过短期，业续比较难看。



开心的派大星

2021-05-26

什么事情做到极致，或多或少都有自己的小细节rick，如果不按照那么做，可能不work，如果把这些累积起来也能称为知识产权了

展开

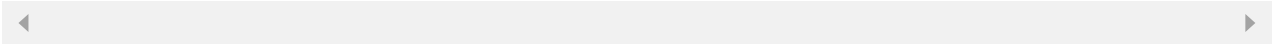
作者回复: 同意，都是知识财富。

springXu

2021-05-26

芯片制造业是技术前沿阵地也是相当重要的环节。
说说生产技术难点。现在的光刻技术，接近到原子的宽度了。在这么小的宽度下做文章技术难度可想而知。也就是如此之小，容易产生电子迁移的问题导致成芯片的下降。
再来看看一个真是的例子。如果生产工艺没有提升的话，这个例子就是intel了，cpu的性能这十年来都被骂是挤牙膏，有部分原因就是生产工艺的落后。看看苹果自研发之路到...
展开

作者回复: Intel的sapphire rapids 会集成HBM……也很厉害



2021-05-26

像前面某个同学所讲，芯片设计，生产，制造，测试这些流程都是皇冠上的明珠，都很重要。

从产业快速发展的角度上讲，分工协作是大势所趋，可以推动技术快速更新迭代，这一点从Intel制程跟台积电的差距可以看出来。...
展开

作者回复: 同意，经济层面只是一方面，国家安全层面的重要度又不一样。